

# 乾燥, 湿潤, 氷板および圧雪路面と大気との間の熱・水蒸気移動

## Heat and water vapor transfer between atmosphere and pavement surface under dry, wet, ice plate and packed snow state

○藤本 明宏<sup>\*1</sup> ・ 福原 輝幸<sup>\*1</sup>・ 渡邊 洋<sup>\*2</sup> ・ 佐藤 威<sup>\*3</sup>

Akihiro Fujimoto Teruyuki Fukuhara Hiroshi Watanabe Takeshi Sato

根本 征樹<sup>\*3</sup> ・ 望月 重人<sup>\*3</sup> ・ 岸井 徳雄<sup>\*4</sup>

Masaki Nemoto Shigeto Mochizuki Tokuo Kishii

### SYNOPSIS

This paper describes water vapor transfer coefficients related to sublimation and evaporation, and heat transfer coefficients between atmosphere and pavement surface under dry, wet, ice plates and packed snow, obtained from wind tunnel tests and a heat energy balance model. In particular, the contact surface area between an asphalt pavement and a snow/ice layer was taken into consideration in the heat conduction flux supplied from the pavement.

Consequently, the roughness heights of four kinds of road surfaces mentioned above were obtained. Moreover, the heat and water vapor transfer coefficients were formulated as a function of the friction velocity for each surface.

### 1. はじめに

冬期道路の安全性と路面管理の経済性を両立させるためには、信頼性の高い路面雪氷状態予測モデルが必要である。

現在、筆者らは熱収支法による路面雪氷状態予測モデルを開発している<sup>1), 2)</sup>。熱収支法は、路面雪氷を横切る様々な熱フラックスを評価し、雪氷状態を予測する手法である。これは地域性を問わないが、多くの影響要因を定量的に把握する必要がある。その影響要因は内的と外的な要因に分けられる。内的要因は地中熱および舗装構造やその熱物性が挙げられる。外的要因は自然的要因と人的要因があり、前者は気象と地形などが、後者は通過車両、凍結防止剤の散布および機械除雪などが、挙げられる。中でも、気象条件が雪氷路面に及ぼす影響は複雑であり、特に、路面上の風による顕熱および水分の相変化に伴う潜熱は正確に評価できていなかった。

そこで、本論文では風洞を用いて、乾燥, 湿潤, 氷板および圧雪路面上の風速分布を求め、各路面の粗度高さや摩擦速度を調べるとともに、大気と路面間の水蒸気輸送係数およ

び熱伝達係数について新たな知見を得たので、ここに報告する。

### 2. 風洞実験の概要

Fig. 1は風洞実験に用いた乾燥, 湿潤, 氷板および圧雪路面の表面状態である。

乾燥および湿潤路面の風洞実験は防災科学技術研究所内の地表面乱流風洞実験装置を用いて、氷板および圧雪路面の風洞実験は防災科学技術研究所新庄支所内の風洞装置を用いて、それぞれ実施した。

本実験は、①風速分布の評価、②大気と路面との間の水蒸気輸送係数の評価、③大気と路面との間の熱伝達係数の評価、の3つに主眼を置いた。

#### 2.1 実験装置

##### 2.1.1 乾燥および湿潤路面

乾燥および湿潤路面の風洞実験(Fig. 2)は、風洞(L3.0×W1.0×H1.0m)、風洞底面に設置した舗装(L0.2×W0.2×H0.05m)、電子重量計、温湿度計、ピトー管および放射収支計(Fig. 1 湿潤路面を参照)により構成される。風洞は風速、

\*1 福井大学工学部 \*2 (株)水工工学研究所 \*3 防災科学技術研究所 \*4 金沢工業大学環境・建築学部

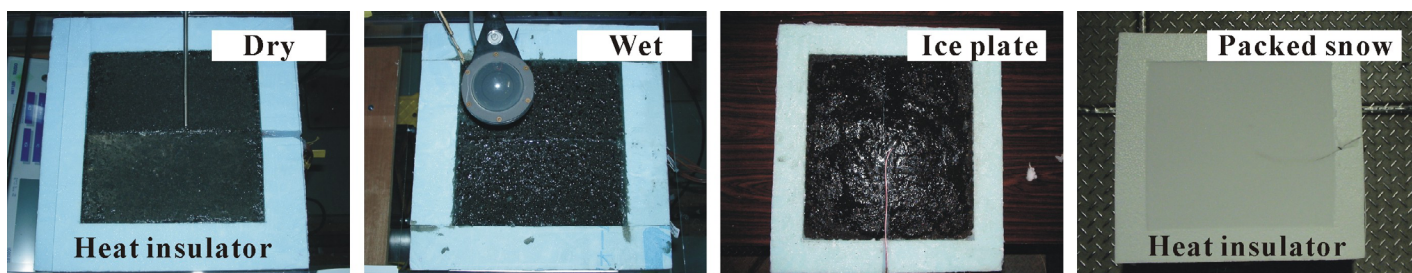


Fig. 1 乾燥, 湿潤, 氷板および圧雪路面の表面状態

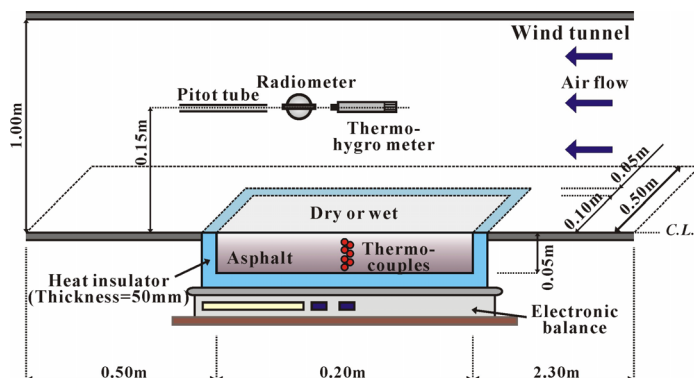


Fig. 2 風洞実験の概要 (乾燥および湿潤路面)

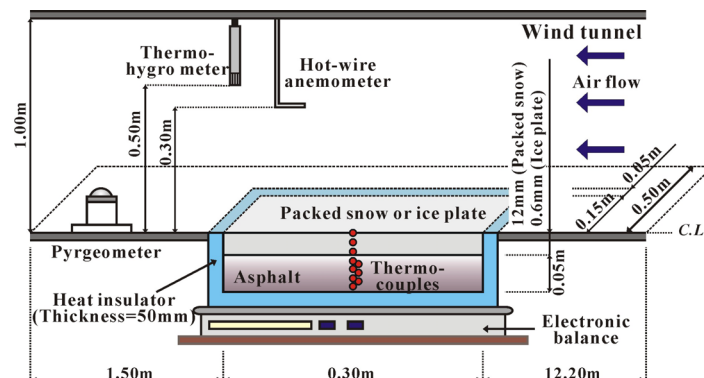


Fig. 3 風洞実験の概要 (氷板および圧雪路面)

温度および湿度の制御が可能である。試験体は密粒アスファルト舗装を使用し、舗装内部の熱移動を計測するために、舗装表面から 5, 10, 15, 25, 35 および 45mm 下方の 6 ヶ所に熱電対を埋設した。また、舗装底部および側部をスタイロフォーム(厚さ=50mm)で断熱した。

### 2.1.2 氷板および圧雪路面

氷板および圧雪路面における風洞実験 (Fig. 3) は、風洞 (L14.0×W1.0×H1.0m)、風洞底面に設置した舗装 (L0.3×W0.3×H0.05m)、舗装上部の圧雪層(厚さ=約 12mm)、あるいは氷板層(厚さ=約 0.6mm)、電子重量計、温湿度計、熱線風速計および長波放射計により構成される。風洞は低温室に設置され、氷点下で風速、温度および湿度の制御が可能である。試験体は熱電対(舗装表面から 5, 10, 15, 25, 35 および 45mm 下方の計 6 点)を埋め込んだ密粒アスファルト舗装であり、表面以外はスタイロフォーム(厚さ=50mm)で断熱した。また、圧雪層の温度は表面から 1, 6, 11mm 下方の計 3 点で、氷板層の温度は表面から 0.3mm 下方の位置で、それぞれ熱電対により測定した。

### 2.2 測定項目

乾燥路面では、舗装温度、放射収支、温湿度および主流風速を計測した。湿潤路面では、乾燥路面の測定項目に加えて、蒸発量を計測した。氷板および圧雪では、舗装温度、

圧雪あるいは氷板温度、長波放射、温湿度、風速および昇華量を計測した。風速は乾燥および湿潤路面ではピトー管を用いて、氷板および圧雪路面では熱線風速計を用いて、それぞれ計測した。蒸発量および昇華量は電子重量計(最小目盛 0.1g)によって、10 秒毎にパソコンへ自動出力される。

### 2.3 実験手順および実験条件

乾燥、湿潤、氷板および圧雪路面の実験手順は、それぞれ以下のとおりである。

乾燥路面の実験では、事前にインキュベータを用いて舗装を温度一様(約 35℃)に暖める。その後、舗装を素早く風洞底面に設置し、実験を開始する。

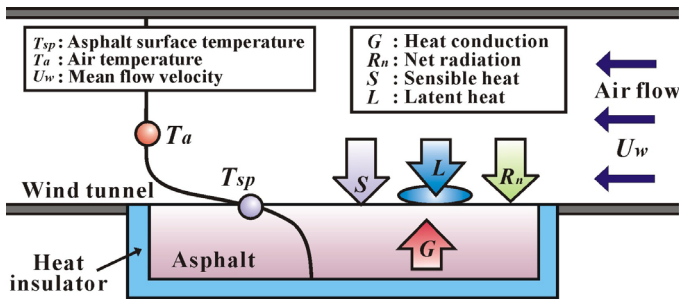
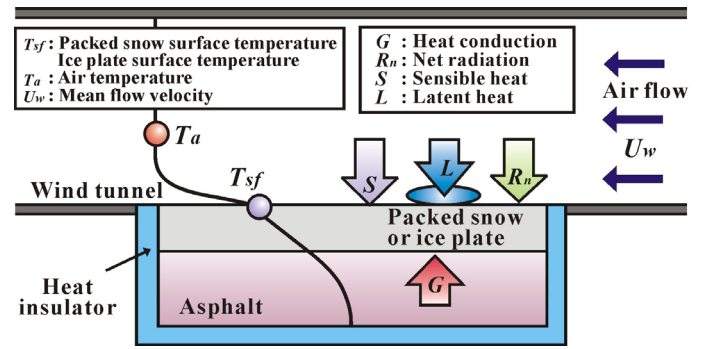
湿潤路面の実験では、風洞内の空気と同じ温度(約 20℃)の舗装を風洞底面に設置する。実験開始直前に噴霧器を用いて、舗装表面に水(約 20℃)を 0.25kg/m<sup>2</sup>で散布し、実験を開始する。

氷板および圧雪路面の実験では、-5℃に設定した実験準備室で舗装内部の温度(約-5℃)を一様にさせる。圧雪路面に関しては、約 12mm の圧雪層(圧雪密度=約 600kg/m<sup>3</sup>)を、氷板路面に関しては、約 0.6mm の氷板を、それぞれ作成する。その後、舗装を素早く風洞底面に設置し、実験を開始する。

Table 1 に風洞実験条件および舗装の物性値を示す。

Table 1 風洞実験条件および舗装の物性値

Item	Unit	Dry	Wet	Ice	Packed
Air temperature	°C	20	20	-15	-15
Relative	%	50	50	10	10
Initial pavement	°C	35	20	-5	-5
Snow/ice	°C	—	20	-5	-5
Thickness of	mm	—	0.25	0.60	12.00
Mean flow	m/s	1.2, 1.9, 2.8,		0.5, 2.0, 4.0, 6.0,	
Specific heat of	kJ/kg/K	0.89			
Thermal	W/m/K	1.60			
Pavement	kg/m <sup>3</sup>	2240			

Fig. 4 風洞実験における舗装表面の熱収支  
(乾燥および湿潤路面)Fig. 5 風洞実験における氷板および圧雪表層の熱収支  
(氷板および圧雪路面)

### 3. 大気と路面との間の熱・水蒸気移動理論

#### 3.1 乾燥および湿潤路面における熱収支

本実験の乾燥および湿潤路面における舗装表層の熱収支は、Fig. 4 の概念図に基づいて、次式で与えられる。

$$(\rho c)_{sp} dV_{sp} \frac{\partial T_{sp}}{\partial t} = G + S + L + R_n \quad (1)$$

ここに、 $(\rho c)_{sp}$ : 舗装表層の体積熱容量 (J/m<sup>3</sup>/K),  $dV_{sp}$ : 舗装表層の微小体積 (m<sup>3</sup>),  $T_{sp}$ : 舗装表層温度 (°C),  $t$ : 時間 (s),  $G$ : 舗装内部からの熱伝導による熱流 (W),  $S$ : 空気移動に伴う顕熱による熱流 (W),  $L$ : 水分の相変化に伴う潜熱による熱流 (W),  $R_n$ : 純放射熱流 (W), である。

#### 3.2 氷板および圧雪路面における熱収支

本実験における氷板および圧雪表層の熱収支は、Fig. 5 の概念図に基づいて、次式で与えられる。

$$\frac{\partial (\rho c h T)_{sf}}{\partial t} dA_{sf} = G + S + L + R_n \quad (2)$$

ここに、 $(\rho c)_{sf}$ : 氷板および圧雪表層の体積熱容量 (J/m<sup>3</sup>/K),

$dA_{sf}$ : 氷板および圧雪表層の微小水平面積 (m<sup>2</sup>),  $h_{sf}$ : 氷板および圧雪表層の厚さ (m),  $T_{sf}$ : 氷板および圧雪表層温度 (°C), である。

本解析では実験条件から知られるように、融雪はなく、 $(\rho c)_{sf}$  の時間変化率および昇華による  $h_{sf}$  の時間変化率は共に十分に小さいことを考慮すると、式 (2) は次のようになる。

$$(\rho c)_{sf} h_{sf} dA_{sf} \frac{\partial T_{sf}}{\partial t} = G + S + L + R_n \quad (3)$$

#### 3.3 舗装と雪氷層間の伝熱

舗装表層 ( $z=0$ ) を横切る熱伝導による熱流 (舗装と雪氷層との間を移動する熱流,  $G$ ) は、次式で与えられる。

$$G = -\alpha_c \lambda_p \frac{\partial T}{\partial z} dA_x \Big|_{z=0} \quad (4)$$

ここに、 $\lambda_p$ : 舗装と雪氷層間の調和平均熱伝導率<sup>1)</sup> (W/m/K),  $z$ : 鉛直下方向の距離 (m),  $dA_x$ :  $z$  方向の熱流と直交する見かけ断面積 (m<sup>2</sup>),  $\partial T / \partial z$ : 舗装表層と雪氷層間の温度勾配, および  $\alpha_c$ : 接触面積率 (舗装と雪氷層との見かけ接触面積に

対する実際の接触面積の比)である。事実, Fig. 6 に示すように, マイクロスコープを用いて, 舗装と圧雪層の接触状況を撮影すると, 舗装と圧雪層の間には氷の粒径と同等のオーダー(約  $40\mu\text{m}$ )の空隙が点在している。そのため, 舗装と雪氷層との間の実接触面積は見かけ上の接触面積( $dA_x$ )より小さく,  $\alpha_c < 1$  となる。 $\alpha_c$  は舗装温度の鉛直分布の再現計算により, 氷板路面で 0.22 および圧雪路面で 0.06 を得た。

### 3.4 空気移動に伴う顕熱

空気移動に伴う顕熱熱流( $S$ )は, *Newton* の冷却則に従い, 次式で与えられる。

$$S = \alpha_s (T_a - T_s) dA_x \quad (5)$$

ここに,  $\alpha_s$ : 熱伝達係数 ( $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ ),  $T_s$ : 圧雪, 氷板および舗装の表面温度,  $T_a$ : 空気温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ), および  $dA_x$ : 構成要素の大気と接する微小面積 ( $\text{m}^2$ ), である。ここで,  $\alpha_s$  は伝熱解析が実験結果と一致するときの値を採用する。

### 3.5 水分の相変化に伴う潜熱

水分の相変化に伴う潜熱熱流( $L$ )は, 次のバルク式により導かれる。

$$L = \alpha_e h_e (\rho_{vs} - \rho_{va}) dA_x \quad (6)$$

ここに,  $\alpha_e$ : 水蒸気輸送係数 ( $\text{m}/\text{s}$ ),  $h_e$ : 蒸発, 凝結および昇華潜熱 (蒸発, 凝結潜熱= $2491\text{kJ}/\text{kg}$ , 昇華潜熱= $2835\text{kJ}/\text{kg}$ ),  $\rho_{vs}$ : 路面表面の水蒸気密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) および  $\rho_{va}$ : 大気の水蒸気密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), である。 $\alpha_e$  は数値解析による  $L$  が実験結果のそれと一致するときの値を採用する。なお,  $\rho_{vs}$  および  $\rho_{va}$  は世界気象機関で採用されている実験式<sup>4)</sup>を用いて求めた。

本伝熱解析は積分有限差分法によって解かれる。

## 4. 実験結果

ここでは, 風洞実験で測定した鉛直風速分布を示すととも

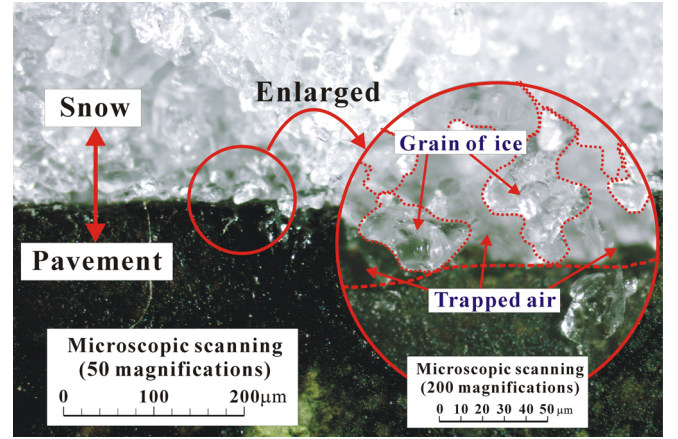


Fig. 6 舗装と圧雪層の接触状況

に, その結果から得られた舗装, 氷板および圧雪の粗度高さ( $k$ )および摩擦速度( $U_*$ )について述べる。

### 4.1 鉛直風速分布

Fig. 7 に乾燥, 湿潤, 氷板および圧雪路面上の鉛直風速分布を片対数表示でそれぞれ示す。 $k$  は同図の乱流域の対数分布を下方に延長して, 風速( $U_w$ )が  $0\text{m}/\text{s}$  になる高度, すなわち粗度高さである。 $k$  は風速に無関係であり, 乾燥路面で  $1.3 \times 10^{-4}\text{m}$ , 湿潤路面で  $1.1 \times 10^{-4}\text{m}$ , 氷板路面で  $7.7 \times 10^{-6}\text{m}$ , 圧雪路面で  $7.4 \times 10^{-6}\text{m}$  であった。なお, 湿潤, 氷板および圧雪路面の  $k$  は, 参考文献 5) と同程度である。

### 4.2 摩擦速度と平均風速分布

Fig. 7 に示すように, 鉛直風速分布は対数則を満たし,  $U_*$  は Table 2 に示す値を得た。そこで,  $U_w$  を  $U_*$  で,  $z$  を  $k$  でそれぞれ無次元化すると, 乾燥, 湿潤, 氷板および圧雪路面に係らず, 風速分布は次式を満たす。

$$\frac{U_w}{U_*} = 2.5 \ln \frac{z}{k} + 0.1 \quad (7)$$

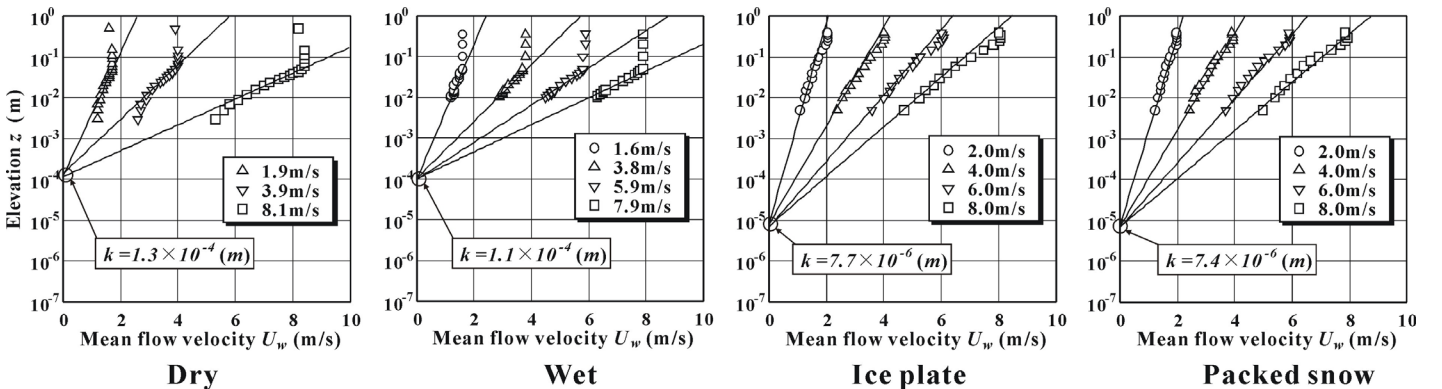


Fig. 7 鉛直風速分布



Table 2 粗度係数と摩擦速度

Condition	Dry			Wet				Ice plate				Packed snow			
$U_w$ (m/s)	1.9	3.9	8.1	1.6	3.8	5.9	7.9	2.0	4.0	6.0	8.0	2.0	4.0	6.0	8.0
$U_*$ (m/s)	0.12	0.26	0.55	0.11	0.25	0.38	0.53	0.07	0.15	0.22	0.29	0.08	0.15	0.22	0.29
$k$ (m)	$1.3 \times 10^{-4}$			$1.1 \times 10^{-4}$				$7.7 \times 10^{-6}$				$7.4 \times 10^{-6}$			

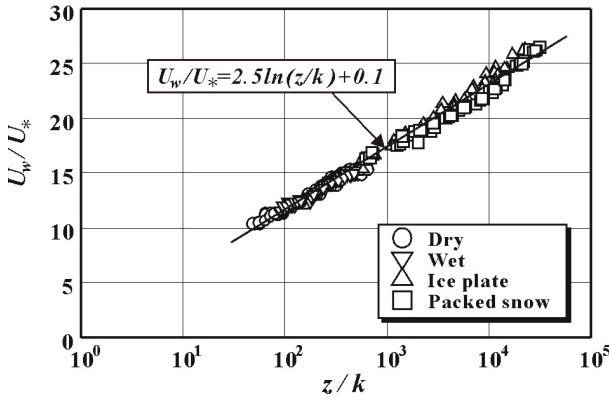


Fig. 8 平均風速分布

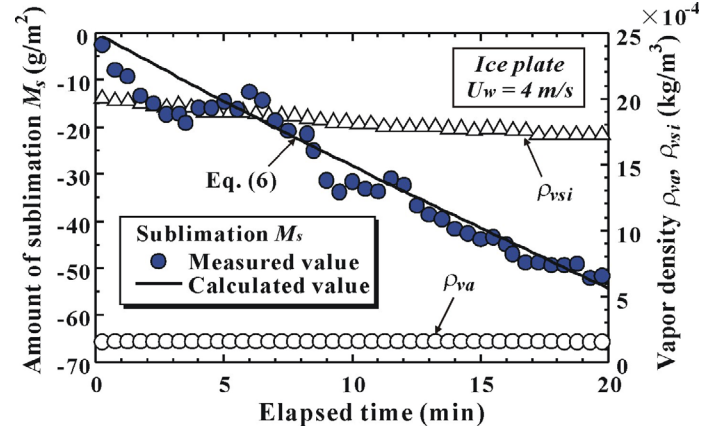


Fig. 9 大気と氷板表面における水蒸気密度, 積算昇華量の実験値と計算値の経時変化

## 5. 解析結果

### 5.1 昇華水蒸気輸送係数と昇華量

ここでは、路面からの昇華量や蒸発量を評価するために、湿潤、氷板および圧雪路面における水蒸気輸送係数( $\alpha_e$ )を定量的に評価した。

#### 5.1.1 氷板路面

Fig. 9 に  $U_w=4\text{m/s}$  における  $\rho_{va}$ , 氷板表面の水蒸気密度( $\rho_{vsi}$ )および  $M_s$  の経時変化を, Fig. 10 に同実験における  $T_a$ , 氷板表層温度( $T_{si}$ )および相対湿度( $RH_a$ )の経時変化を, それぞれ示す。また, Fig. 9 には  $M_s$  の実験値と一致するように,  $\alpha_e=0.027\text{m/s}$  として, 式(6)から求めた  $M_s$  の計算値を実線で併せて示した。

$T_a$ (◇)は $-15^\circ\text{C}$ 付近を,  $RH_a$ (◎)は 11%付近を, それぞれ推移した。一方,  $T_{si}$ (▽)は空気移動による顕熱と昇華潜熱の影響を受けて, 初期温度の $-10.8^\circ\text{C}$ から時間経過とともに  $T_a$ (◇)に漸近し, 20 分後には $-12.5^\circ\text{C}$ まで低下した。  $\rho_{va}$ (○)は実験期間を通して, 常に  $1.6 \times 10^{-4}\text{kg/m}^3$  程度であることに対して,  $\rho_{vsi}$ (△)は初期の  $20.0 \times 10^{-4}\text{kg/m}^3$  から  $T_{si}$ (▽)の低下に起因して穏やかに減少し, 20 分後には  $16.3 \times 10^{-4}\text{kg/m}^3$  となった。

#### 5.1.2 圧雪路面

Fig. 11 に圧雪路面の風洞実験( $U_w=4\text{m/s}$ )における  $\rho_{va}$ , 圧雪表面の水蒸気密度( $\rho_{vss}$ )および  $M_s$  の実験値と計算値の経時変化を, Fig. 12 に同実験における  $T_a$ , 圧雪表層温度( $T_{ss}$ )

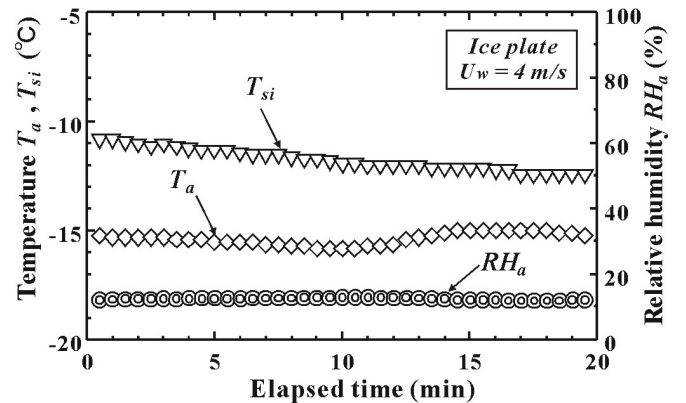


Fig. 10 気温, 氷板表層温度および相対湿度の経時変化

および  $RH_a$  の経時変化を, それぞれ示す。  $T_a$ (◇)は約  $-16.5^\circ\text{C}$ ,  $RH_a$ (◎)は約 11%であり, 両者とも実験期間を通して, 大きな変化はない。  $T_{ss}$ (▽)は空気移動に伴う顕熱と昇華潜熱の影響により,  $-14.0^\circ\text{C}$ から $-14.7^\circ\text{C}$ まで穏やかに低下した。  $\rho_{vss}$ (△)および  $\rho_{va}$ (○)は実験期間を通して, 概ね  $15.0 \times 10^{-4}\text{kg/m}^3$  および  $1.6 \times 10^{-4}\text{kg/m}^3$  であった。

$M_s$  の実験値(●)はばらつくものの, 時間経過とともに低下傾向にあり,  $\alpha_e=0.012\text{m/s}$  とした式(6)の計算値(実線)と概ね一致した。

#### 5.1.3 水蒸気輸送係数と摩擦速度の関係

Fig. 13 に大気と湿潤, 氷板および圧雪路面間の  $\alpha_e$  と  $U_w$  の関係を示す。なお,  $U_w=0\text{m/s}$  の  $\alpha_e$  は参考文献8)を引用した。

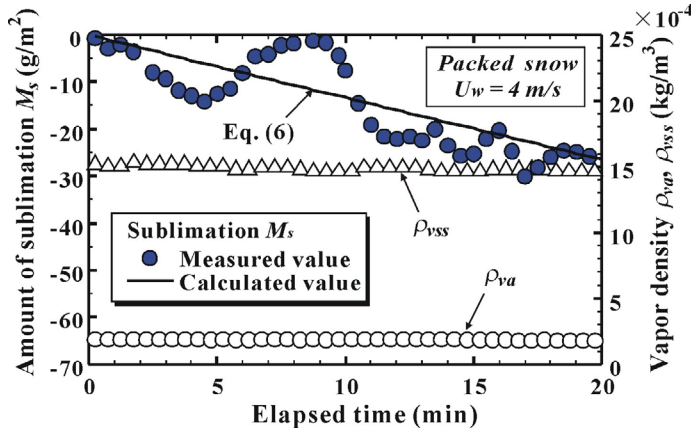


Fig. 11 大気と圧雪表面における水蒸気密度、積算昇華量の実験値と計算値の経時変化

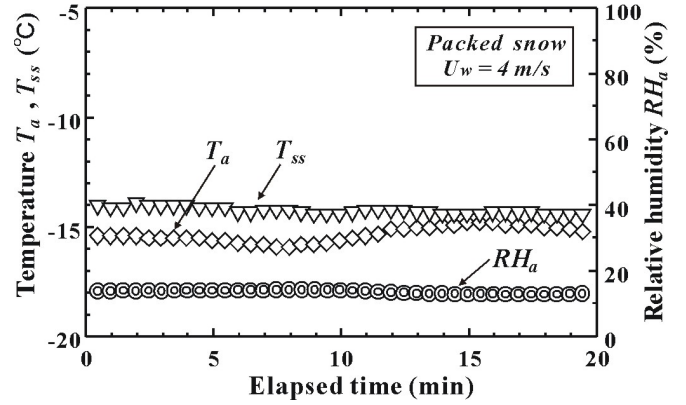


Fig. 12 気温、圧雪表層温度および相対湿度の経時変化

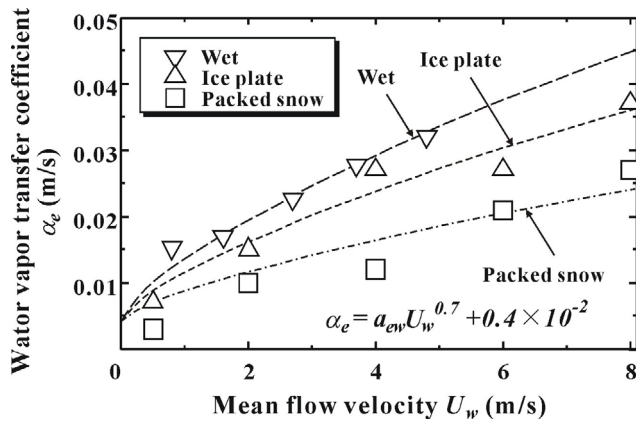


Fig. 13 水蒸気輸送係数と主流風速の関係

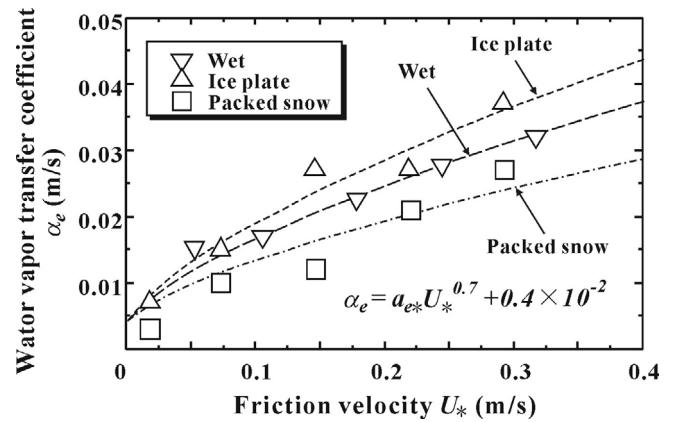


Fig. 14 水蒸気輸送係数と摩擦速度の関係

湿潤路面における $\alpha_e$ と $U_w$ の関係は、参考文献7)を参照されたい。その結果、いずれの路面においても、 $\alpha_e$ は $U_w$ の0.7乗に比例して増大し、次式で表される。

$$\alpha_e = a_{ew} U_w^{0.7} + 0.4 \times 10^{-2} \quad (8)$$

ここに、 $a_{ew}$ は路面状態で変わる比例定数である。

次に、先述した式(7)の $U_w/U_*$ と $z/k$ の関係より、 $\alpha_e$ は $U_*$ を用いて Fig. 14 に示す式で表される。

$$\alpha_e = a_{e*} U_*^{0.7} + 0.4 \times 10^{-2} \quad (9)$$

ここに、 $a_{e*}$ は路面状態で変わる比例定数である。

各路面の $a_{ew}$ および $a_{e*}$ は Table 3 に示すとおりである。 $a_{ew}$ は湿潤、氷板、圧雪路面の順に、 $a_{e*}$ は氷板、湿潤、圧雪路面の順に、小さくなる。

## 5.2 大気と路面間の熱伝達係数と熱収支

ここでは、空気移動に伴う顕熱熱流を評価するために、乾燥、湿潤、氷板および圧雪路面における熱伝達係数( $\alpha_s$ )を

Table 3 水蒸気輸送係数に関する係数

Road surface condition	$a_{ew}$ (m/s)	$a_{e*}$ (m/s)
Wet	$9.5 \times 10^{-3}$	$6.4 \times 10^{-2}$
Ice plate	$7.4 \times 10^{-3}$	$7.6 \times 10^{-2}$
Packed snow	$4.6 \times 10^{-3}$	$4.7 \times 10^{-2}$

定量的に評価した。

### 5.2.1 氷板路面

Fig. 15 に  $U_w=2$  m/s における氷板層および舗装内部温度分布の経時変化およびそれらの温度分布と良好に一致した $\alpha_s=8.1$  W/m²/K のときの計算結果を示す。Fig. 16 はその際の氷板表層の熱収支成分の経時変化を示しており、正の熱フラックスは氷板表層への熱供給(氷板表層の温度上昇に貢献)を、負のそれは熱損失(氷板表層の温度低下に貢献)を意味し、 $Flux(\odot)$ は内部エネルギーの時間変化率を表す。

熱収支成分に着目すると、 $G(\Delta)$ は常に正であり、時間経過とともに穏やかに減少する。一方、 $R_n(\diamond)$ 、 $S(\nabla)$ および

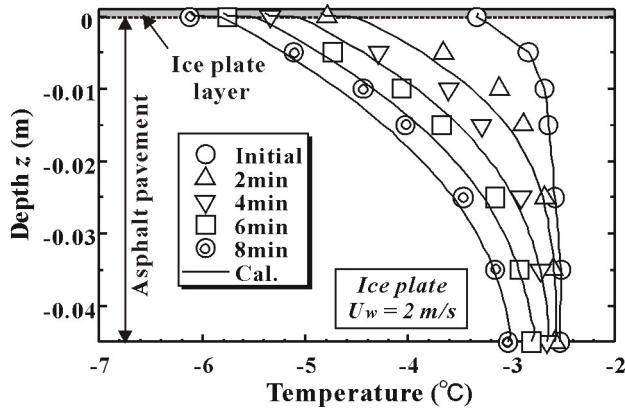


Fig. 15 氷板層および舗装内部温度分布の経時変化

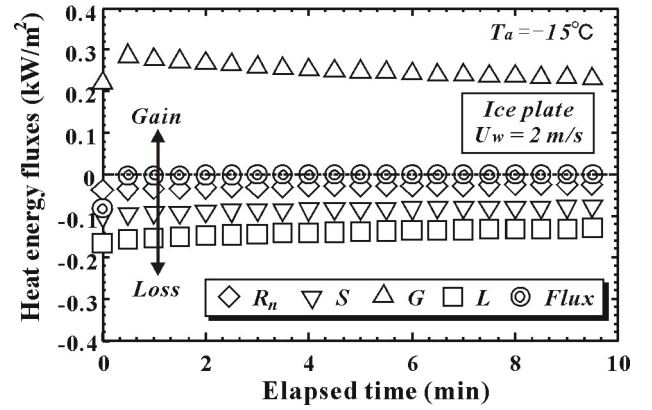


Fig. 16 氷板表層における熱収支成分の経時変化

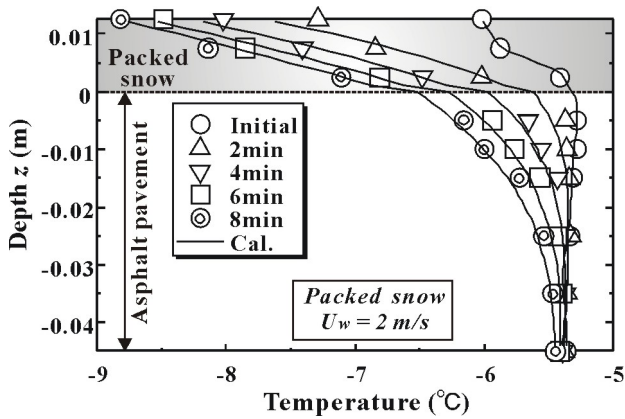


Fig. 17 圧雪層および舗装内部温度分布の経時変化

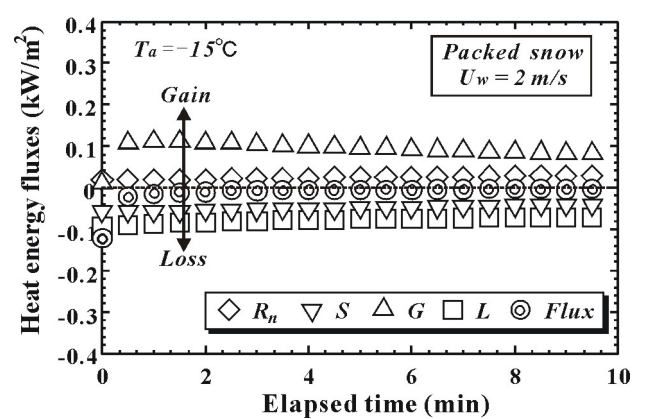


Fig. 18 圧雪表層における熱収支成分の経時変化

$L(\square)$ は常に負であり、 $S(\nabla)$ および $L(\square)$ は氷板表層と大気との温度差が小さくなることに起因して緩やかに減少する。 $R_n(\diamond)$ は他の熱収支成分と比較して絶対値が小さい。また、 $Flux(\odot)$ は常に負であり、時間経過とともに減少する。

以上より、氷板表層の温度変化は、主に $L(\square)$ 、 $S(\nabla)$ および $G(\triangle)$ によって規定される。なお、氷板からの長波放射熱フラックスはその射出率を0.97<sup>3)</sup>として、Stefan-Boltzmannの法則に従って求めた。

### 5.2.2 圧雪路面

Fig. 17に $U_w=2\text{m/s}$ における圧雪層および舗装内部温度分布の実験値(シンボル)と実験値に最も適合する $\alpha_s=14.0\text{W/m}^2\text{K}$ のときの計算値(実線)を示す。Fig. 18は同実験における熱収支成分の経時変化である。圧雪表層の熱収支において、 $G(\triangle)$ と $R_n(\diamond)$ は正であることから圧雪表層への熱供給に貢献し、逆に $S(\nabla)$ と $L(\square)$ は熱損失に寄与する。ここで、 $R_n(\diamond)$ は氷板路面の熱収支では負であることに對して、圧雪路面では正である。この要因は圧雪路面の射出率(0.87<sup>3)</sup>)が氷板路面の射出率(0.97)と比較して小さいこと

に加えて、圧雪路面の表面温度が氷板路面のそれよりも低かったことが考えられる。

以上、本実験における圧雪路面では、 $S(\nabla)$ および $L(\square)$ の熱損失を $G(\triangle)$ および $R_n(\diamond)$ が補うように作用する。

### 5.2.3 熱伝達係数と摩擦速度の関係

Fig. 19に大気と路面間の $\alpha_s$ と $U_w$ の関係を示す。同図には、参考文献9)を引用した乾燥および湿潤路面における $\alpha_s$ と $U_w$ の関係も併せて示す。結果、 $\alpha_s$ は $U_w$ の0.7乗に比例して増大する。すなわち、

$$\alpha_s = a_{sw} U_w^{0.7} + 2.2 \quad (10)$$

ここに、 $a_{sw}$ は路面状態で変わる比例定数である。なお、 $U_w=0\text{m/s}$ における $\alpha_s$ は、参考文献8)を引用した。

$\alpha_s$ と $U_*$ の関係は、Fig. 20に示すように、いずれの路面も次式で表される。

$$\alpha_s = a_{s*} U_*^{0.7} + 2.2 \quad (11)$$

ここに、 $a_{s*}$ は路面状態で変わる比例定数である。

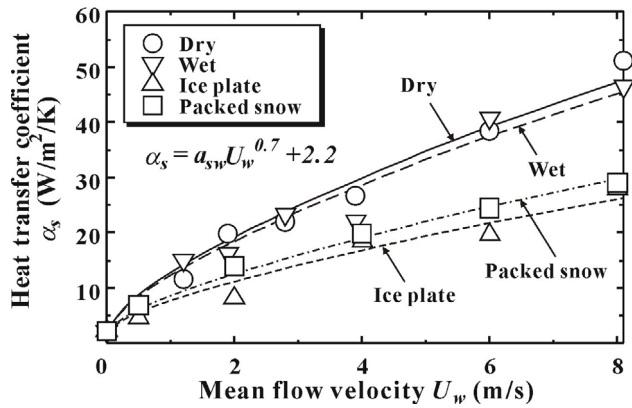


Fig. 19 熱伝達係数と主流風速の関係

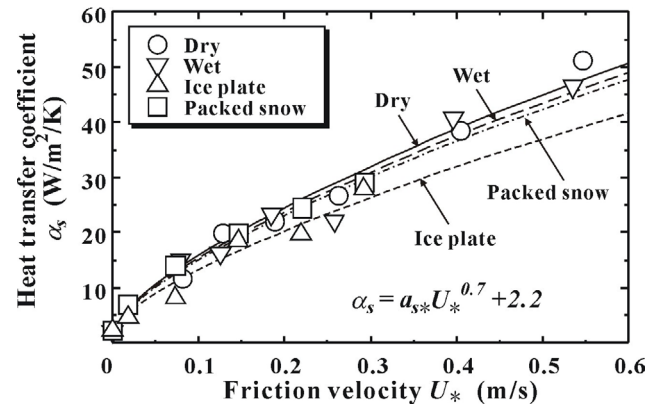


Fig. 20 熱伝達係数と摩擦速度の関係

$a_{sw}$  および  $a_{s*}$  は Table 4 に示すとおりであり、乾燥、湿潤、圧雪、氷板路面の順に小さい。

## 6. おわりに

熱収支法に基づいて路面雪氷状態予測モデルを構築するにあたり、未解明な空気移動に伴う顕熱および水分の相変化に伴う潜熱に関わる大気と路面間の熱・水蒸気移動特性を、本研究で詳細に検討した。

具体的には、乾燥、湿潤、氷板および圧雪路面における①風速分布、②大気と路面との間の水蒸気輸送係数、③大気と路面との間の熱伝達係数、の評価を風洞実験によって試みた。

その結果、以下の結論を得ることができた。

1. 摩擦速度 ( $U_*$ ) を用いた乾燥、湿潤、氷板および圧雪路面の風速分布は、粗度高さ ( $k$ ) を用いて次式で表される、

$$\frac{U_w}{U_*} = 2.5 \ln \frac{z}{k} + 0.1$$

ここで、 $k = 1.3 \times 10^{-4} \text{m}$  (乾燥路面)、 $1.1 \times 10^{-4} \text{m}$  (湿潤路面)、 $7.7 \times 10^{-6} \text{m}$  (氷板路面)、 $7.4 \times 10^{-6} \text{m}$  (圧雪路面) である。

2. 乾燥、湿潤、氷板および圧雪路面における大気と路面との間の水蒸気輸送係数 ( $\alpha_e$ ) は、 $U_*$  の 0.7 乗に比例して増大する。すなわち、

$$\alpha_e = a_{e*} U_*^{0.7} + 0.4 \times 10^{-2}$$

ここで、 $a_{e*} = 6.4 \times 10^{-2}$  (湿潤路面)、 $7.6 \times 10^{-2}$  (氷板路面)、 $4.7 \times 10^{-2}$  (圧雪路面) である。

Table 4 熱伝達係数に関する係数

Road surface condition	$a_{sw}$ (W/m²/K)	$a_{s*}$ (W/m²/K)
Dry	10.4	69.5
Wet	10.0	67.1
Ice plate	5.6	56.5
Packed snow	6.4	65.0

3. 熱伝達係数 ( $\alpha_s$ ) もまた、 $U_*$  の 0.7 乗に比例し、次式で与えられる。

$$\alpha_s = a_{s*} U_*^{0.7} + 2.2$$

ここで、 $a_{s*} = 69.5$  (乾燥路面)、 $67.1$  (湿潤路面)、 $56.5$  (氷板路面)、 $65.0$  (圧雪路面) である。

## 参考文献

- 1) 例えば、荒川智之・渡邊洋・福原輝幸：熱収支法による路面凍結解析—乾燥、湿潤および積雪路面における熱的挙動—、寒地技術論文・報告集, Vol. 16, pp. 389-395, 2000.11.
- 2) 武士俊也・福原輝幸・横山孝男・渡邊洋・林健一・藤本明宏：熱収支法による路面凍結解析 —車両タイヤ-圧雪層-路面間の熱移動—、寒地技術論文・報告集, Vol. 18, pp. 71-76, 2002.
- 3) 西川兼康・藤田恭伸：伝熱学, 理工学社, 1982.
- 4) 日本機械学会：湿度・水分測定と環境のモニタ, 技報堂出版株式会社, 1992.
- 5) 竹内清秀・近藤純正：大気科学講座 I 地表に近い大気, 東京大学出版会, 1981.
- 6) 室田明：応用流体力学, 共立出版株式会社, 1969.



- 7) 門野浩二・福原輝幸・岸井徳雄・早野美智子:送風下におけ砂表面からの蒸発フラックスの推定, 土木学会年次学術講演会概要集, II -015, pp. 29-30, 2004.
- 8) 渡邊洋・福原輝幸:橋梁道路と大気との間の熱・水分輸送と路面凍結現象, 水工学論文集, Vol. 39, pp. 183-188, 1995.
- 9) 藤本明宏・渡邊洋・福原輝幸・岸井徳雄・早野美智子:乾燥および湿潤路面における大気と路面との間の熱・水分移動特性, 第 21 回日本雪工学会大会論文報告集, Vol. 21, pp. 31-32, 2004.